第38卷　第3期
2021年5月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 38 No. 3
May 2021

焉耆盆地绿洲农田不同类型土壤有机碳空间分布特征及储量估算

史常明[1]，柳　洋[1]，张富荣[1]，赵云飞[1]，肖锦锦[1]，汪　霞[1,2]

（1. 兰州大学资源环境学院，甘肃 兰州 730000；2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室，甘肃 兰州 730000）

摘　要：土壤有机碳(SOC)是生态系统稳定性和农业生产力的基础，充分了解焉耆盆地绿洲不同土壤类型SOC分布特征，对实现农业系统可持续发展具有重要意义。以新疆焉耆盆地绿洲长期定点试验的监测数据为基础，利用生物地球化学模型(DNDC)进行模拟试验，研究在当前的田间管理和气候模式下，焉耆盆地绿洲农田土壤有机碳密度(SOCD)和土壤有机碳储量(SOCS)的空间分布特征，并探究了在不同的土壤类型下SOCD和SOCS的差异性。结果表明：(1) DNDC模型能够很好的模拟该区域下SOC及其动态变化，模型相关系数(r)>92.75%，相对误差(E)介于2.98%~4.12%，<5%，模型的可靠性较高。(2) 2018年焉耆盆地绿洲农田0~20 cm SOCD介于12000~28000 kg·hm^{-2}，SOCS为2414 Gg，不同区域之间的差异较为明显。(3) 不同的土壤类型之间，SOCD和SOCS差异明显，其中沼泽土的SOCD最大，为25136 kg·hm^{-2}；石质土的SOCD最小，为13335 kg·hm^{-2}。

关键词：土壤有机碳；DNDC模型；焉耆盆地绿洲；土壤类型；有机碳储量；农田土壤

全球变暖和气温上升已经成为了无可置疑的事实[1]。土壤有机碳(SOC)是陆地生态系统中最大的碳库，也是全球碳循环的重要组成部分，是影响生态系统稳定性和农业生产力的关键因素[2-3]。我国农田面积约为1.4×10^8 hm^2，是典型的农业大国，农业生态系统中SOC占陆地生态系统SOC总储量的10%[4]。因此，准确评估农业生态系统碳循环情况，对全球碳循环和全球气候变化的反馈及响应有着重要的意义，而且对我国农业系统可持续发展和我国粮食安全有着重要的意义[5]。

早期的研究主要基于全国第二次土壤普查提供的大量数据资料，根据土壤剖面数据进行土壤有机碳储量(SOCS)的估算[6-7]。随着研究的深入，学者们开始利用3S技术和土壤数据库优化碳库估算，更偏向于SOC时空分布特征与影响因素方面的探索[8-12]。因SOC自身周转过程的复杂性和环境条件的多样性，使得其周转过程极难预测，且由于时间和空间上的局限性，现有的田间试验无法准确揭示出不同的环境条件下的农田SOC动态变化过程。近年来，越来越多的学者们开始使用DNDC模型，在一定程度解决了SOC演变的模拟与预测难题[13-16]。从国内外的研究结果来看，近年来关于SOC方面的研究，主要集中在小尺度、不同的田间管理措施和不同的土地利用方式上，对于不同的土壤类型对SOC的影响的研究较少，且对于焉耆盆地绿洲SOCS估算的研究数据更是缺乏。DNDC具有输入参数简单、模拟效果良好的优点，在研究SOCS方面具有很强的优势性，已经被广泛的使用到土壤肥力和温室气体排放的预测研究中[17]。

新疆占地面积约为全国的1/6，是我国典型的干旱与半干旱地区，也是受全球气候变化影响最为敏感的区域之一。焉耆盆地是连接“一带一路”经济带和中巴经济走廊的关键节点和重要驿站，焉耆盆地还是我国优质长绒棉及高品质绒棉的重要产区之一，具有极强的区域优势[18]。焉耆盆地绿洲目前正处于由传统农业向现代化农业的转型的过程中，面临着保障粮食安全、农副产品增产和增加农田SOCS的多重压力。鉴于此，本文以新疆焉耆盆地绿

收稿日期：2020-07-19；　**修订日期：**2021-03-14
基金项目：国家自然科学基金(41971051)；第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0603)；科技基础资源调查专项(2017FY100900)
作者简介：史常明(1995-)，男，硕士研究生，从事土壤碳循环研究. E-mail: shichm18@lzu.edu.cn
通讯作者：汪霞. E-mail: wangxia@lzu.edu.cn

洲农田为研究对象，采用焉耆县、博湖县、和静县以及和硕县2013—2018年定点试验的观测数据为基础，通过DNDC点位模拟验证模型，扩展到区域模拟，对焉耆盆地绿洲农田土壤有机碳密度（SOCD）和SOCS空间分布特征以及不同土壤类型下的分布特征进行模拟研究。研究结果将有助于向类似区域增加农田SOC、改善不同的土壤类型提供的管理措施，以及应对全球气候变化、未来农田的可持续发展和确保我国粮食安全战略提供数据支持和科学依据。

1　材料和方法

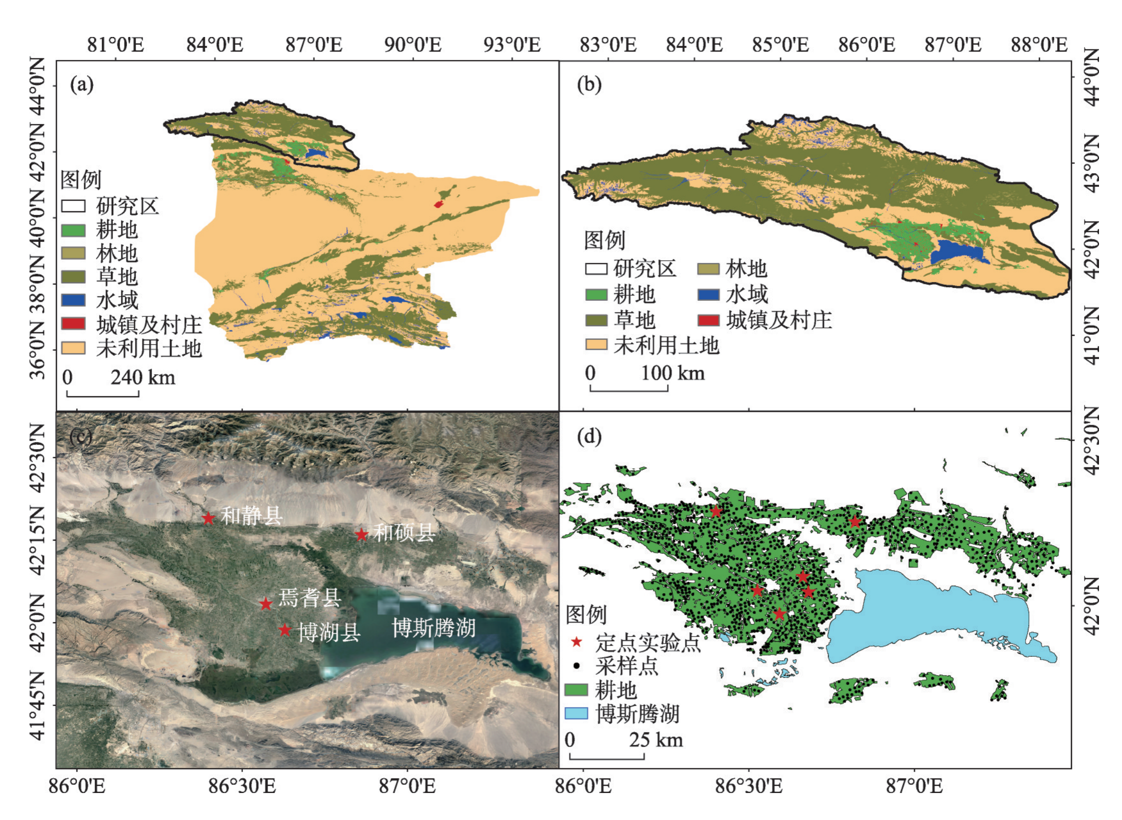
1.1　研究区概况

研究区位于新疆焉耆盆地（41°53′~42°52′N，86°46′~85°08′E），研究区主要包括4个县：焉耆县、博湖县、和静县以及和硕县（图1）。焉耆盆地深居中亚内陆地区，地势东南低西北高，西北多山，南部是海拔1050~2000 m的低洼沙漠。气候属于典型干旱区绿洲气候特征，年平均气温8.9 ℃，年日照时长3074~3163 h。平均无霜期为185 d，寒暑温差大，年平均降水量约为80 mm，多年平均蒸发量约为2500 mm，干燥多风。整个焉耆盆地现有农田面积2583 km^2，土壤类型以棕漠土、草甸土、潮土、沼泽土和风沙土为主，自然植被主要为红柳、骆驼刺、罗布麻、甘草和麻黄等[19]。

1.2　试验设计

1.2.1　定点试验设计　点位定点试验设置在焉耆县、博湖县、和静县以及和硕县，共有6组处理（表1），试验开始于2013年，每块试验田的面积为2500 m^2（50 m×50 m），初始土壤质地分别为：粉砂质壤土、壤土和砂质壤土，其中选取的农作物是当地的主要经济作物。

1.2.2　土壤样品采集　2013—2018年间，每年植物生长茂盛期（7—8月），在每块定点试验田中，按照"S"型采样法采样。采取表层（0~20 cm）土壤样品，按照0~10 cm和10~20 cm分层取样，每层土壤采样6个，将上述土壤样品混合在一起，混合土壤样品采用四分法，并记录每个采样点的基础信息；土壤容重、孔隙度和田间持水量采用环刀法现场测定，样



注：(a) 2015年巴音郭楞蒙古自治州土地利用图，(b) 2015年焉耆盆地土地利用图，(c) 焉耆盆地农田影像图，(d) 2018年焉耆盆地农田土壤采样点分布图。

图1　2018年焉耆盆地绿洲农田采样点及土地利用空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of farmland sampling points and land use in the oasis of Yanqi Basin in 2018

表1 试验处理

Tab. 1 Test treatment

类别	处理					
	YL	YF	BF	BY	JX	SX
种植作物	辣椒	番茄	番茄	玉米	春小麦	春小麦
土壤质地	粉砂质壤土	粉砂质壤土	粉砂质壤土	壤土	壤土	砂质壤土
土壤类型	棕漠土	沼泽土	潮土	潮土	棕漠土	棕漠土
种植日期	04-15	04-15	04-05	04-05	04-05	04-15
收获日期	09-25	09-15	09-15	10-05	10-05	07-20
N/(kg·hm^{-2})	140.33	135.07	149.25	159.41	184.32	168.89
P_2O_5/(kg·hm^{-2})	47.11	40.86	41.30	50.43	52.21	45.08
K_2O/(kg·hm^{-2})	96.89	115.1	111.96	140.62	130.24	128.24
秸秆还田比例/%	50	50	50	50	50	50
初始有机碳含量/(g·kg^{-1})	13.88	11.09	8.56	9.26	9.16	10.02
初始容重/(g·cm^{-3})	1.31	1.28	1.27	1.36	1.42	1.34

注:YL表示位于焉耆县种植作物为辣椒;YF表示位于焉耆县种植作物为番茄;BF表示位于博湖县种植作物为番茄;BY表示位于焉耆县种植作物为玉米;JX表示位于和静县种植作物为小麦;SX表示位于和硕县种植作物为小麦。

品密封后带回实验室,用来测量土壤有机碳、粒径、pH等。

1.3 样品处理及测定分析

土壤有机碳使用总碳分析仪测定(耶拿HT 1300,德国),称取一定量的研磨土采用10%盐酸去除盐分,蒸馏水冲洗调节pH至中性,烘干研磨后用铝锡箔纸上机测定[20]。土壤粒径由激光粒度分析仪测定(Mastersizer 2000,英国马尔文生公司),称取一定量的过筛土置于烧杯中,在通风处内加入双氧水并加热去除有机质,加入稀盐酸去除碳酸盐,然后加入配置好的分散剂放入超声波清洗器中震荡,待超声波清洗结束后上机测定[21]。土壤容重采用环刀法测量,用已知重量的环刀分别取0~10 cm、10~20 cm不同土壤层的土壤样品,并测定环刀和土壤质量,每个样点进行3次重复。将环刀和土样带回实验室后用烘箱烘干,测量土壤含水率,并计算土壤容重[22]。土壤容重的计算方式如下:

$$\rho = \frac{m}{v(1+\theta)} \tag{1}$$

式中:m为环刀湿重(g);v为环刀容积(100 cm^3);θ为含水量;ρ为土壤容重(g·cm^{-3})。

土壤有机碳密度计算公式为:

$$\mathrm{SOCD} = C_i \times P_i \times H_i \tag{2}$$

式中:SOCD为土壤有机碳密度(kg·hm^{-2});C_i为第i个格点土壤SOC含量(g·kg^{-1});P_i为第i个格点土壤容重(g·cm^{-3});H_i为剖面深度(m)。

土壤有机碳储量计算公式为:

$$\mathrm{SOCS} = \sum_i^n S_i \times \mathrm{SOCD}_i \tag{3}$$

式中:SOCS为土壤有机碳储量;S_i为第i个格点的面积(hm^2);n为总格点数;SOCD_i为第i个格点土壤SOC密度(kg·hm^{-2})[22-23]。

1.4 数据获取

1.4.1 气象数据 2013—2018年气象数据包括焉耆县、博湖县、和静县以及和硕县的日最高、最低气温、降水量和平均风速(数据来源于国家气象数据共享网http://data.cma.cn)。

1.4.2 土壤数据 2013—2018年的土壤数据包括土壤质地、容重、有机质、pH、田间持水量、表土下SOC降低速率等,这些数据均来自于田间采样后实验室的分析测定。样地最大产量、灌溉、施肥种类和数量、秸秆还田率、除草次数、播种和收获时间等来自于2013—2018年记录下来的田间管理措施以及调查农户收集的数据和统计年鉴(焉耆县、博湖县、和静县以及和硕县)。

1.4.3 作物数据 来源于2013—2018年田间实测数据和焉耆县、博湖县、和静县以及和硕县统计年鉴。作物的播种、收获、灌溉、施肥和除草等措施,通过调查农户和根据各地的统计年鉴收集到的数据。

1.4.4 遥感数据 2015年土地利用方式(30 m分辨率),中国土壤类型空间分布数据(1 km分辨率)、DEM高程图、全国县级及乡镇边界数据和全国土壤质地数据均来自于中国科学院资源环境科学数据

中心(http://www.resdc.cn)。

1.5 DNDC模型参数设置

研究所使用的DNDC模型版本为9.5。DNDC模型是目前全球应用最广泛的一种生物地球化学过程的机理模型，它将碳、氮循环的物理、化学和生物过程利用计算机技术结合起来，是建立在理论分析和试验观测基础上的一个理想化的生物地球化学模型[24]。虽然模型的每个模拟过程都以理论和观测数据为基础，但由于土壤碳、氮循环过程具有很强的时空差异性，而新疆深居内陆，属于干旱区，具有特殊的气候特征，所以在使用DNDC进行相关模拟的时候，要对模型的一些重要参数进行修改和本地化[22](表2)。修改的过程是进行DNDC的点位模拟，按照模型要求输入模型运行所需的气象数据、土壤数据和田间管理措施等，进行模拟。对比模拟运行结果和田间实测结果拟合程度，然后逐步的进行修改模型当中的默认值，如黏土比例、孔隙度、萎蔫点、田间持水量等。进行反复的模拟调整，使得模拟结果和田间实测值之间的拟合程度达到最佳。

1.6 DNDC模型验证

采用4个统计学指标：平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、相对误差(E)和相关系数(r)这4个统计指标来评价此模型的精度，其公式如下：

$$\mathrm{MAE}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|P_i-O_i\right|}{n} \tag{4}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(P_i-O_i\right)^2}{n}} \tag{5}$$

$$\mathrm{E}=\frac{100}{n}\times\sum_{i=1}^{n}\frac{O_i-P_i}{O_i} \tag{6}$$

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i-\bar{O}\right)\left(P_i-\bar{P}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i-\bar{O}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(P_i-\bar{P}\right)^2}} \tag{7}$$

式中：O_i是实测值；P_i是模拟值；n是实测值的总数；i是当前实测值的数目。

均方根误差(RMSE)是用来衡量模拟值同实测值之间的一致性，值越小，说明模拟值和实测值之间的误差越小[25]。平均绝对误差(MAE)能更好的反映模拟值误差的实际情况，MAE的介于0~1，值越小，模拟值与实测值之间的关联度就越大。相对误差(E)能够很好的反应模型的可信程度。相关系数(r)是实测值和模拟值之间相关性的度量，范围从-1(完全负相关)到1(完全正相关性)，r值越靠近0，证明相关性越弱[26]。

2 结果与分析

2.1 DNDC模型验证

点位模拟的有效性采用土壤有机碳含量为验证的指标，采用4种不同的统计学指标，在DNDC模型中运行得到的SOC与实测值之间进行对比分析。由表3可知，6组处理中均方根误差(RMSE)值介于1.2%~2.5%，均小于10%，表明模拟值与实测值一致性非常好；平均绝对误差(MAE)值介于1.2%~2.1%，均小于2.1%，表明模型与实测值之间的关联度较大；相对误差(E)介于2.98%~4.12%，均小于5%，说明模型的可靠性良好；相关系数(r)介于92.75%~99.45%，说明模型观测值和模拟值之间的相似度极高。综上所述，可以证明DNDC模型在本地的适用性良好，可以使用DNDC模型进行模拟研究。由图2可知，在秸秆还田率50%和施加化肥等田间措施的情况下，每组试验的SOC含量均有不同的增长，2019年的SOC比2013年的SOC含量增长了2%~5%。

2.2 SOC密度的空间分布特征

由图3可知，2018年焉耆盆地绿洲农田的SOCD值介于12000~28000 kg·hm^{-2}，最大值和最小值之间相差2.3倍。其中靠近博斯腾湖的西部，SOCD的密

表2 DNDC模型部分本地化参数值

Tab. 2 Localized values of some parameters of DNDC model

参数	默认值			观测值		
	粉砂质壤土	壤土	砂质壤土	粉砂质壤土	壤土	砂质壤土
黏土比例	0.140	0.190	0.090	0.120	0.078	0.083
孔隙度	0.485	0.451	0.435	0.479	0.459	0.421
萎蔫点	0.20	0.22	0.15	0.25	0.28	0.19
田间持水量	0.40	0.49	0.32	0.43	0.50	0.36

表3 模型精度评价的结果

Tab. 3 Model accuracy evaluation results

类别	处理					
	YL	YF	BF	BY	JX	SX
RMSE/%	1.2	2.5	2.1	2.3	1.2	1.7
MAE/%	1.30	2.10	1.67	1.63	1.20	1.50
E/%	3.56	4.12	3.12	3.45	3.33	2.98
r/%	96.14	92.75	99.45	97.49	99.24	98.55

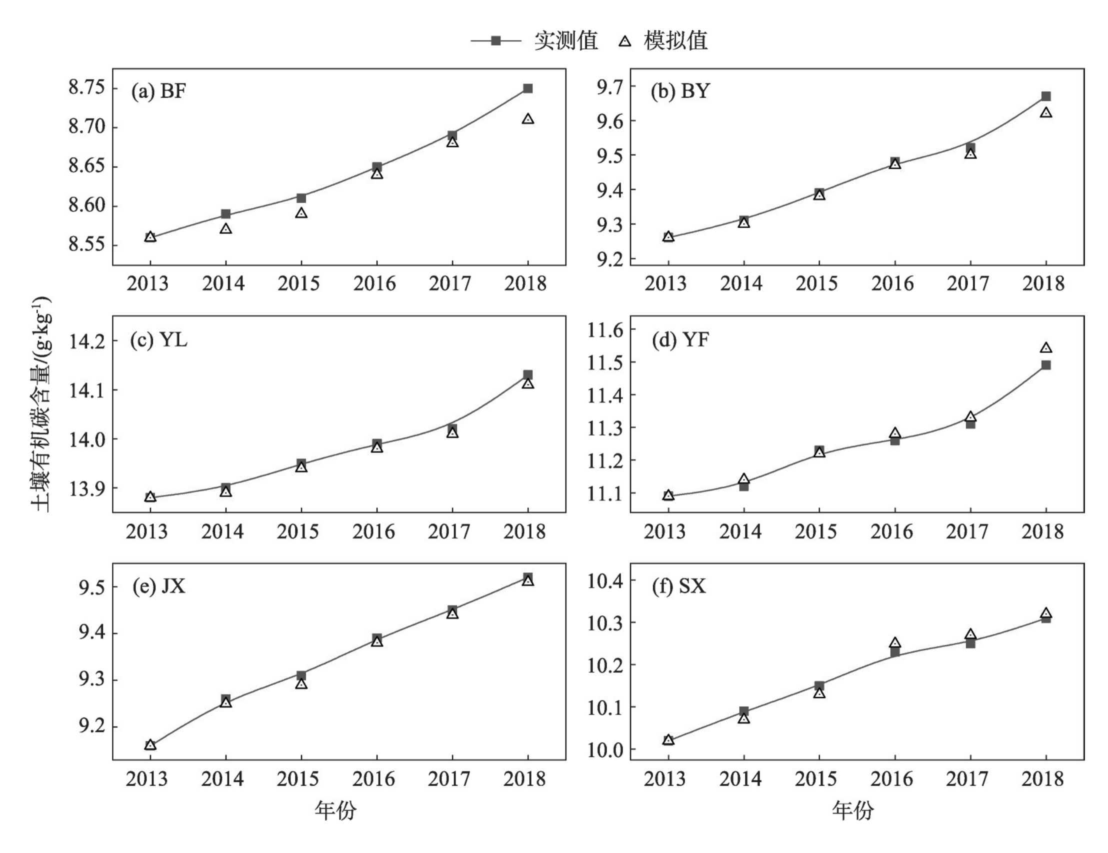


图2 土壤有机碳实测值和模拟值对比

Fig. 2 Comparison of measured and simulated soil organic carbon values

度达到最大值,介于24000~28000 kg·hm^{-2}。在研究区的西北侧,SOCD值介于12000~16000 kg·hm^{-2},是整块区域中SOCD值最小的地方。在焉耆盆地的中部,主要集中4个县城的驻点,附近有大量的人口聚居,此处的SOCD值介于24000~28000 kg·hm^{-2},是区域SOCD最高的地方。整块区域SOCD分布的特征呈现靠近博斯腾湖的中间地区SOCD值较高,向四周SOCD值逐渐减少。在开都河沿岸,SOC的含量均保持在较高的水平。在焉耆县和博湖县附近,SOCD的密度相对较高,和硕县和和静县SOCD的密度相对较低。

2.3 不同土壤类型下SOC密度和储量的分布特征

不同的土壤类型因理化性质的不同,导致其不同类型之间的SOCS和SOCD有显著的差异。根据焉耆盆地绿洲农田2018年土壤有机碳密度分布图,结合全国土壤类型图,计算出不同土壤类型下土壤有机碳密度和储量。表4和图4为焉耆盆地绿洲农田2018年主要的土壤类型下的SOCS和SOCD,统计结果表明,在焉耆盆地绿洲农田不同土壤类型中SOCD较高的是沼泽土和潮土,分别是25135 kg·hm^{-2}和24234 kg·hm^{-2};SOCD较低的是风沙土和石质土,分别是16303 kg·hm^{-2}和13334 kg·hm^{-2};分布面积较广的是潮土和棕漠土,分别是849 km^{2}和692 km^2,约占总面积的32.87%和26.79%;分布面积较小的分别是风沙土和石质土,分别是65 km^{2}和12 km^2,约占总总面积的2.52%和0.46%;SOCS较高的是潮土和盐

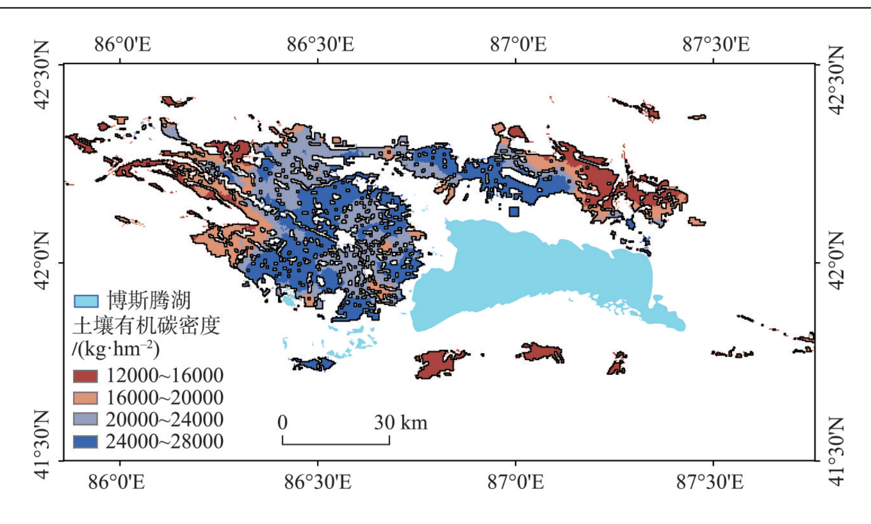


图3 2018年焉耆盆地绿洲农田土壤有机碳密度分布

Fig. 3 Soil organic carbon density distribution in an oasis of Yanqi Basin in 2018

表4 2018年焉耆盆地绿洲不同土壤类型下土壤有机碳储量

Tab. 4 Soil organic carbon storage under different soil types in the oasis of Yanqi Basin in 2018

土壤类型	面积/km^2	百分比/%	SOCS/Gg	百分比/%	SOCD/($kg·hm^{-2}$)
棕漠土	692	26.79	347.45	14.39	17200
风沙土	65	2.52	58.69	2.43	16303
石质土	12	0.46	4.71	0.20	13334
草甸土	290	11.23	364.73	15.11	20490
潮土	849	32.87	1017.85	42.16	24234
沼泽土	97	3.76	123.16	5.10	25135
盐土	461	17.85	380.95	15.78	23228
灌漠土	117	4.53	116.65	4.83	19770

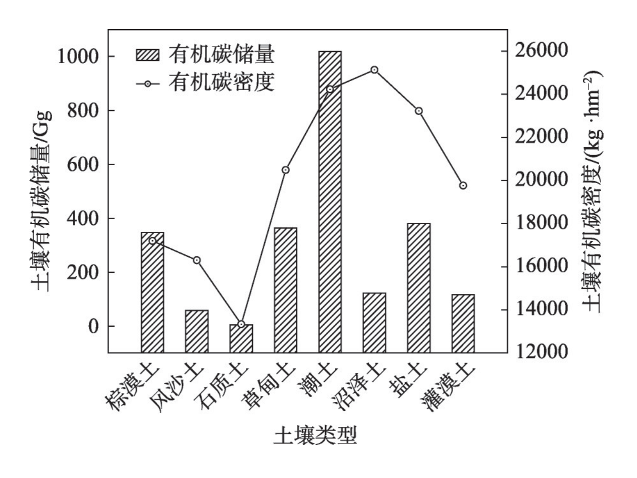


图4 不同土壤类型下焉耆盆地绿洲农田土壤有机碳密度和储量分布

Fig. 4 Soil organic carbon density and storage distribution under different soil types in oasis farmland of Yanqi Basin

土,分别为1017.85 Gg(1 Gg=10^6 kg)和347.45 Gg,约占总储量的42.16%和15.78%;SOCS较低的是风沙土和石质土,分别是58.69 Gg和4.71 Gg,约占总储量的2.43%和0.20%。

表5和图5为焉耆盆地绿洲各县主要土壤类型的面积、SOCS和SOCD,统计结果表明,焉耆县主要的土壤类型为潮土和棕漠土,占该县总面积的50.79%和23.91%,SOCS分别为398.42 Gg和86.96 Gg,SOCD分别为24594 kg·hm^{-2}和19291 kg·hm^{-2}。博湖县主要的土壤类型为潮土和草甸土,占该县总面积的32.55%和25.06%,SOCS分别为162.00 Gg和133.60 Gg,SOCD分别为24179 kg·hm^{-2}和20875 kg·hm^{-2}。和硕县主要的土壤类型为棕漠土和盐土,占该县总面积的49.97%和23.11%,SOCS分别为179.10 Gg和148.50 Gg,SOCD分别为16254 kg·hm^{-2}和23951 kg·hm^{-2}。和静县主要的土壤类型为潮土和草甸土,占该县总面积的35.12%和21.05%,SOCS分别为278.93 Gg和179.64 Gg,SOCD分别为23052 kg·hm^{-2}和19960 kg·hm^{-2}。不同的土壤类型因为其组成成分的不同,导致其土壤有机碳密度之间存在

表5 焉耆盆地绿洲各县不同土壤类型面积和百分比

Tab. 5 Area and percentage of different soil types in different counties of oasis in Yanqi Basin

土壤类型	焉耆县		博湖县		和硕县		和静县	
	面积/km^2	百分比/%	面积/km^2	百分比/%	面积/km^2	百分比/%	面积/km^2	百分比/%
棕漠土	154.16	23.91	58.24	14.00	376.83	49.97	102.77	14.76
风沙土	0	0	1.81	0.43	3.61	0.48	0	0
石质土	0	0	0	0	0	0	0	0
草甸土	22.81	3.54	104.27	25.06	16.29	2.16	146.63	21.05
潮土	327.47	50.79	135.44	32.55	141.50	18.76	244.59	35.12
沼泽土	15.84	2.46	37.61	9.04	0	0.00	43.55	6.25
盐土	92.76	14.39	78.71	18.92	174.28	23.11	115.25	16.55
灌漠土	31.73	4.92	0	0	41.64	5.52	43.63	6.26

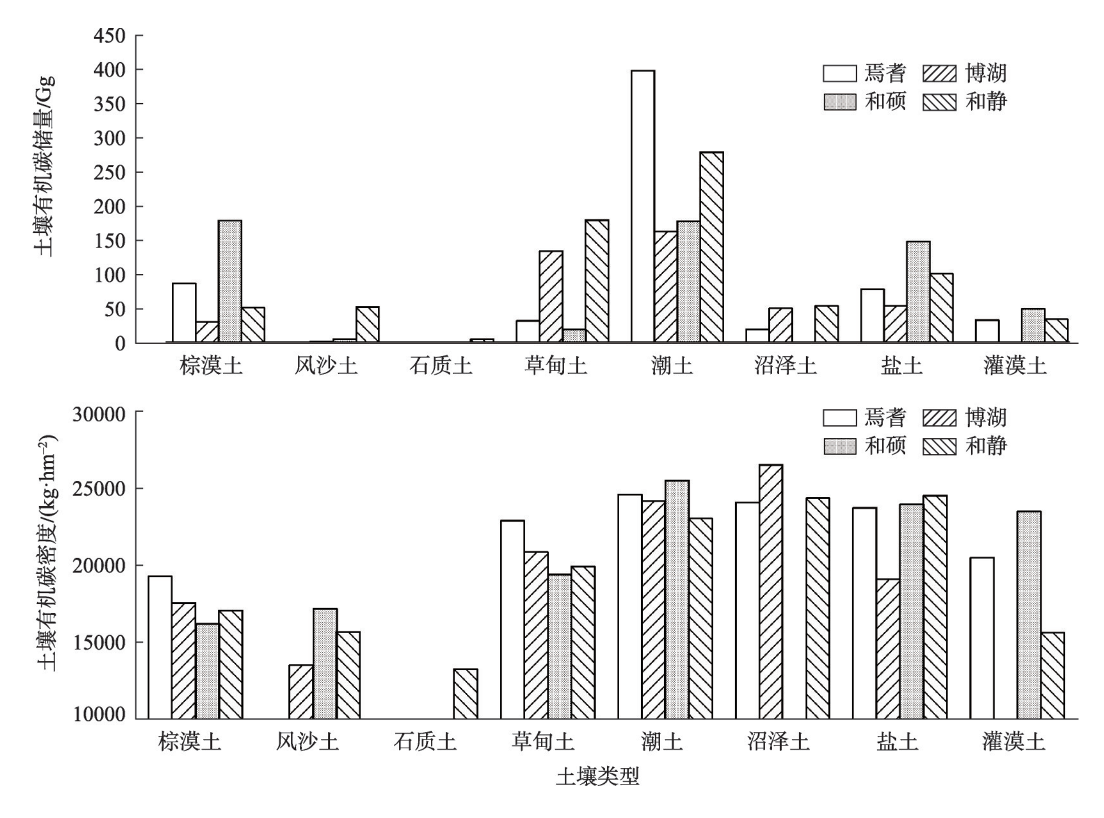


图5 焉耆盆地绿洲不同土壤类型下农田土壤有机碳密度和储量特征

Fig. 5 Soil organic carbon density and storage characteristics of farmland under different soil types in Yanqi Oasis Basin

着较大的差异性，在SOCS估算中，应当充分考虑到不同土壤类型对于储量的影响性。

3 讨论

SOC的变化是一个漫长且复杂的过程，影响其变化的因子有很多，如土壤的温度、湿度、氧化还原、降水量、CO_2浓度、土壤pH、土壤类型、人类活动的扰动等[23]。本研究主要探究不同的土壤类型及其在空间分布上的差异性对SOCS和SOCD的影响。利用长期点位试验的结果，对DNDC模型当中的参数进行了本土化校正，采用了均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、相对误差(E)和相关系数(r)这四种统计学参数，验证了DNDC模型在焉耆盆地绿洲农田SOC预测的适用性。在验证DNDC模型可靠性的基础上，对焉耆盆地绿洲农田进行区域模拟。结果显示，焉耆盆地绿洲农田SOCS为2414 Gg，耕地总面积为2583 km^2，约占全国SOCS的0.027‰，耕地面积约占全国总耕地面积的1.8‰，SOCS低于全国平均值[7, 27-28]。焉耆盆地绿洲农田

SOCD介于12000~28000 kg·hm^{-2},最大值与最小值之间的差距较大。其中SOCD较大的区域分布主要分布在焉耆盆地旱地的中间部分,靠近焉耆县和博湖县,并沿着开都河分布。从中间向四周SOCD出现逐步减少的趋势,其中SOCD最低的地区主要集中在焉耆盆地绿洲的东北和西北方。焉耆盆地绿洲气候、生态类型多样,地势上西北高,东南低。东南侧靠近博斯腾湖,水分差异较大,这可能是导致SOCD空间差异较大的原因之一。

焉耆盆地绿洲土壤类型较多,主要有8种不同土壤类型[22]。其中潮土和棕漠土所占的面积较大,占农田面积的32.87%和26.79%,受到人为的扰动也较多。潮土的平均SOCD为24234 kg·hm^{-2},SOCS为1017.85 Gg,潮土是我国主要的农业土壤类型,分布地势平坦,土层深厚,水资源较丰富,造种性广。同时因为潮土土壤养分较为缺乏,大部分属于中、低产土壤,作物产量低而不稳,加强对潮土的合理利用和改良,对我国农业系统可持续发展和我国粮食安全有着重要的意义[29]。棕漠土的平均SOCD为17200 kg·hm^{-2},SOCS为347.45 Gg。棕漠土是我国土壤类型中面积最大的,棕漠土区气候极端干旱(降水量<50 mm),只有通过灌溉才能种植作物。因为焉耆盆地绿洲光照热量条件充沛,合理的进行水灌溉,农业作物产量的生产力较高。SOCD最高的土壤类型是沼泽土,平均SOCD为25135 kg·hm^{-2},这是因为沼泽土具有季节性或长年的停滞性积水,表面层积聚了大量的有机物,分解程度低[30]。石质土的SOCD为13334 kg·hm^{-2}是所有土壤类型中最小的,这是因为石质土是一种与母岩风化物性质接近的土壤,成土作用不明显,没有剖面发育,地表水土流失严重,保水保肥力差。因此在SOCS和SOCD的估算当中,应当充分的考虑到不同土壤类型的影响[31]。

SOCS和SOCD的估算一直存在着较大的争议,SOC的空间分布异质性明显,野外实测调查在取样的过程中也存在着较大的差异性。本研究通过在焉耆盆地绿洲积累的多年定点试验数据,验证了DNDC模型,并对DNDC模型进行了本地化参数设置。同时,又将DNDC区域模拟的最小单元划分到乡(镇)的同一土壤类型,尽量的减少了空间异质性。但是,本文仅针对当前的气候模式和农田管理措施对农田0~20 cm土层SOCD和SOCS进行了研究,并在此基础上探讨不同土壤类型的差异性,并未在时间尺度上对SOC的变化进行展开,在今后的研究中,有待进一步的深入探究。

4 结 论

本研究使用DNDC模型模拟研究得出,在当前的农业措施下焉耆盆地绿洲农田0~20 cm土层SOCD和SOCS分布呈现中部高四周低的趋势。焉耆盆地绿洲农田土壤类型较多,不同的土壤类型之间SOCD和SOCS差异较大,SOCD最大的沼泽土25135 kg·hm^{-2}是SOCD最小的石质土13334 kg·hm^{-2}的1.88倍。土壤类型的转变对SOC具有较为深远的影响,合理的田间管理对土壤类型之间的转变影响较大,未来应当在农业生产生活中加强对不同土壤类型之间的管理。

参考文献(References):

[1] Enríquez-de-Salamanca Álvaro, Díaz-Sierra Rubén, Martín-Aranda Rosa M, et al. Environmental impacts of climate change adaptation[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2017, 64: 87–96.

[2] Scharlemann Joern P W, Tanner Edmund Vj, Hiederer Roland, et al. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. Carbon Management, 2014, 5(1): 81–91.

[3] 李园园, 王蕾, 刘琪璟, 等. 新疆喀纳斯自然保护区森林碳储量及碳密度变化[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1136–1145. [Li Yuanyuan, Wang Lei, Liu Qijing, et al. Changes of carbon storage and carbon density of forests in the Kanas national nature reserve, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1136–1145.]

[4] 路晓彤, 刘绍贵, 张黎明, 等. 1980—2008年苏北旱地土壤有机碳含量变化特征[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2020, 49(1): 132–139. [Lu Xiaotong, Liu Shaogui, Zhang Liming, et al. Dynamic characteristics of soil organic carbon in the upland of northern Jiangsu Province between 1980 and 2008[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 49(1): 132–139.]

[5] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623–1627.

[6] 罗薇, 张会化, 陈俊坚, 等. 广东省土壤有机碳储量及分布特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(9): 1593–1601. [Luo Wei, Zhang Huihua, Chen Junjian, et al. Storage and spatial distribution of soil organic carbon in Guangdong Province, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(9): 1593–1601.]

[7] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533–544. [Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu, Li Kerang, et al. Analysis on spatial distribution

characteristics of soil organic carbon reservoir in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 533-544.]

[8] Bhunia Gouri Sankar, Shit Pravat Kumar, Maiti Ramkrishna. Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC)[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2018, 17(2): 114-126.

[9] Zhang Chaosheng, McGrath David. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods[J]. Geoderma, 2004, 119(3-4): 261-275.

[10] 赵永存, 史学正, 于东升, 等. 不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 379-385. [Zhao Yongcun, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. Different methods for prediction of spatial patterns of soil organic carbon density in Hebei province, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 379-385.]

[11] 陈曦. 广西土壤有机碳储量估算及与全国部分省区的比较研究[J]. 地理科学, 2014, 34(10): 1247-1253. [Chen Xi. Estimation of soil organic carbon reserves in Guangxi and comparion study with some provinces in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(10): 1247-1253.]

[12] 张广创, 王杰, 刘东伟, 等. 基于GIS的锡尔河中游生态敏感性分析与评价[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 506-513. [Zhang Guangchuang, Wang Jie, Liu Dongwei, et al. Analysis and evaluation of the ecological sensitivity in the middle reaches of the Syr Darya River based on GIS[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 506-513.]

[13] Chi Yanbing, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Finding the optimal fertilizer type and rate to balance yield and soil GHG emissions under reclaimed water irrigation[J]. Science of The Total Environment, 2020, 729: 138954.

[14] Li Ruihua, Lin Hua, Niu Haipeng, et al. Smallholder preference and agroecosystem service trade-offs: A case study in Xinzheng County, China[J]. Agricultural Systems, 2019, 168: 19-26.

[15] 邱建军, 王立刚, 唐华俊, 等. 东北三省耕地土壤有机碳储量变化的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1166-1171. [Qiu Jianjun, Wang Ligang, Tang Huajun, et al. Study on the situation of soil organic carbon storage in arable lands in northeast China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(8): 1166-1171.]

[16] 张凡, 李长生, 王政. 耕作措施对陕西耕作土壤碳储量的影响模拟[J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 1021-1028. [Zhang Fan, Li Changsheng, Wang Zheng. Modeling the impacts of management alternatives on soil carbon storage of farmland in Shanxi province [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(6): 1021-1028.]

[17] 张琳, 邵景安. 未来30年川东平行岭谷区县域农田SOC动态模拟[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1848-1857. [Zhang Lin, Shao Jingan. Dynamic simulation of farmland SOC in parallel ridge valley area in eastern Sichuan in the next 30 years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(12): 1848-1857.]

[18] 吴世新, 周可法, 刘朝霞, 等. 新疆地区近10年来土地利用变化时空特征与动因分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 52-58. [Wu Shixin, Zhou Kefa, Liu Zhaoxia, et al. Study on the temporal and spatial dynamic changes of land use and driving forces analyses of Xinjiang in recent 10 years[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(1): 52-58.]

[19] 安外尔·艾力, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 靳万贵, 等. 新疆焉耆盆地农田土壤重金属环境容量分析[J]. 环境工程, 2020, 38(3): 168-173. [Anwar Eli, Mamattursun Eziz, Jin Wangui, et al. Environmental capacity of heavy metals in farmland soils in Yanqi Basin, Xinjiang[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(3): 168-173.]

[20] 黄政. 甘肃陇南山地人工植被土壤有机碳密度及固碳潜力研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. [Huang Zheng. Soil Organic Carbon Density and Carbon Sequestration Potential of Artificial Vegetation in Longnan Mountains Area of Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.]

[21] 黄小忠, 陈发虎, 肖舜, 等. 新疆博斯腾湖沉积物粒度的古环境意义初探[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 291-297. [Huang Xiaozhong, Chen Fahu, Xiao Shun, et al. Primary study on the environmental significances of grain-size changes of the Lake Bosten sediments[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(3): 291-297.]

[22] 贾海霞. 不同气候情景对焉耆盆地土地利用变化下土壤有机碳储量影响的模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. [Jia Haixia. Simulation Research for Impact in Different Climate Scenarios on Soil Organic Carbon Storage under Land Use Change in Yanqi Basin. [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.]

[23] 李长生. 生物地球化学的概念与方法——DNDC模型的发展[J]. 第四纪研究, 2001, 21(2): 89-99. [Li Changsheng. Biogeochemical concepts and methodologies: Development of the DNDC model[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(2): 89-99.]

[24] 王德营, 姚艳敏, 司海青, 等. 黑土有机碳变化的DNDC模拟预测[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 277-283. [Wang Deying, Yao Yanmin, Si Haiqing, et al. Using DNDC model to simulate and predict changes in black soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(3): 277-283.]

[25] Zhang Liming, Zheng Qiaofeng, Liu Yaling, et al. Combined effects of temperature and precipitation on soil organic carbon changes in the uplands of eastern China[J]. Geoderma, 2019, 337: 1105-1115.

[26] 贾海霞, 汪霞, 李佳, 等. 新疆焉耆盆地绿洲区农田土壤有机碳储量动态模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5106-5116. [Jia Haixia, Wang Xia, Li Jia, et al. Dynamic simulation of soil organic carbon storage in farmland of the Yanqi Basin Oasis area, in Xinjiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5106-5116.]

[27] 颜安. 新疆土壤有机碳-无机碳空间分布特征及储量估算[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. [Yan An. Spatial Distribution and Storages Estimation of Soil Organic Carbon and Soil Inorganic Carbon in Xinjiang, China[D]. Beijing: China Agricultural University,

2015.]

[28] 唐敏. 中国土壤有机碳时空分布及影响因素研究进展[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2019, 31(4): 42−49, 82. [Tang Min. Research advances in spatial and temporal distribution of soil organic carbon and its influencing factors in China[J]. Journal of Henan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2019, 31(4): 42−49, 82.]

[29] 张金涛, 卢昌艾, 王金洲, 等. 潮土区农田土壤肥力的变化趋势[J]. 中国土壤与肥料, 2010(5): 6−10. [Zhang Jintao, Lu Changai, Wang Jinzhou, et al. The change of farmland soil fertility in fluvo aquic soil district of China[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2010(5): 6−10.]

[30] Yang Rong, Su Yongzhong, Wang Min, et al. Spatial pattern of soil organic carbon in desert grasslands of the diluvial-alluvial plains of northern Qilian Mountains[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(2): 136−144.

[31] 李颖, 刘秀明, 周德全. 中国南方喀斯特地区SOC空间异质性及其对碳储量估算的指示意义[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(8): 256−264. [Li Ying, Liu Xiuming, Zhou Dequan. Spatial heterogeneity of SOC in Karst areas of South China and its indicative significance for carbon reserve estimation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(8): 256−264.]

Soil organic carbon spatial distribution and reserve estimation of different soil types in Yanqi Basin oasis area

SHI Changming[1], LIU Yang[1], ZHANG Furong[1], ZHAO Yunfei[1], XIAO Jinjin[1], WANG Xia[1,2]

(1. School of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. Key Laboratory of Western Environment and Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: We investigated the density and spatial distribution of Yanqi basin oasis farmland soil organic carbon (SOC) among different soil types. Using long-term monitoring data from the Yanqi basin of the Xinjiang oasis area, we applied the DeNitrification-DeComposition (DNDC) model to conduct a simulated experiment. The results of the experiment showed that the DNDC model accurately simulated the SOC and its dynamic changes in this region, producing a correlation coefficient (r) higher than 92.75%. The relative error (E) was between 2.98% and 4.12%, indicating that the model has high reliability. In 2018, the SOC density in the 0-20 cm layer in the oasis area of Yanqi Basin was 12000−28000 kg·hm^{-2}, and the total soil organic carbon reserves were 2414 Mg, with obvious differences among regions. Additionally, significant differences in SOC density and reserves were detected among soil types. The SOC density was highest in marsh soil at 25136 kg·hm^{-2} and lowest in stony soil at 13335 kg·hm^{-2}. The implementation of specific field management measures for different regions and soil types is essential to restore the SOC cycle balance and facilitate the sustainable development of farmland in China.

Keywords: oil organic carbon; DeNitrification-DeComposition model; Yanqi Oasis Basin; different soil types; organic carbon reserves; farmland soil